

Л.А. Бохоева, д-р техн. наук, проф., bohoeva@yandex.ru
А.В. Первалов, аспирант
А.С. Чермошенцева, аспирант
В.Ю. Курохтин, аспирант
Б.Д. Лыгденов, д-р техн. наук, проф.
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
В.Е. Рогов, д-р техн. наук, проф.
Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН
г. Улан-Удэ

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В статье определены характеристики сопротивления усталости конструкции лопасти несущего винта вертолета. Представлена методика построения кривой усталости по результатам испытаний от 10 до 84 образцов, построены полные вероятностные диаграммы усталости.

Ключевые слова: *испытания, методика, усталость, образцы, режимы испытаний, лопасть винта вертолета.*

L.A. Bokhoeva, D. Sc. Engineering, Prof.
A.V. Perevalov, P.G.
A.S. Chermoshentseva, P.G.
V.Yu. Kurokhtin, P.G.
B.D. Lygdenov, Dr. Sc. Engineering, Prof.
V.E. Rogov, D. Sc. Engineering, Prof.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FATIGUE RESISTANCE CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT EQUIPMENT

The paper defines the characteristics of fatigue resistance of construction of helicopter main rotor blade. The technique of constructing of the fatigue curve based on the results of tests of 10 to 84 samples is presented, full probabilistic fatigue charts are constructed based on tests results.

Key words: *tests, technique, fatigue, specimens, tests modes, helicopter rotor blade.*

Усталостное разрушение металлов наиболее опасно, поскольку в условиях отсутствия пластической деформации, «сигнализирующей» о приближающейся опасности, разрушение происходит внезапно и может привести к катастрофе. Все это приводит к необходимости расширения круга вопросов, подлежащих исследованию.

Как правило, характеристики сопротивления усталости материалов определяют путем испытания при различных уровнях напряжений серии одинаковых лабораторных образцов или деталей из одного материала [1, 2].

В зависимости от требований к точности и полноте получаемых характеристик либо применяют обычную методику построения кривой усталости по результатам небольшого числа образцов (до 10), либо испытывают большее количество образцов (50-100), и по результатам испытаний строят полные вероятностные диаграммы усталости.

В данной работе приведен расчет характеристик сопротивления усталости как по обычной методике построения кривой усталости (рассмотрены результаты испытаний 8 образцов среднего участка лопасти вертолета), так и по методике проведения испытаний большего числа образцов (84) с последующей вероятностной трактовкой результатов испытаний. В первом случае кривые усталости построены в полулогарифмических координатах. Кривые

усталости аппроксимируют двумя прямыми линиями наклонной в диапазоне $N = 8,8 \cdot 10^6$ ($\lg(N) = 6,5$) до $N = 50 \cdot 10^6$ ($\lg(N) = 7,69$) и при $N > 50 \cdot 10^6$ циклов. Во втором случае диаграммы усталости представляют собой семейство кривых распределения усталостной долговечности в координатах: вероятность $P(\%)$ – число циклов до разрушения $\lg(N)$ с параметром σ_α ; напряжения σ_α – число циклов до разрушения $\lg(N)$ с вероятностью $P(\%)$; разрушающие напряжения y_σ – вероятность $P(\%)$ при различных циклах до разрушения N .

Наблюдения за амплитудой колебаний образцов производились по мерному клину, который устанавливался, по возможности, в месте наибольших амплитуд колебаний образцов. Растягивающая статическая подгрузка на образцах задавалась таким образом, чтобы в них возникали напряжения, предусмотренные программой испытаний. После задания растягивающей статической подгрузки, образцы нагружались знакопеременными изгибающими моментами, с уменьшением их ступенями через каждые 2 мм амплитуды по мерному клину. Начальная амплитуда напряжений, при которой возникают переменные напряжения и переменные изгибающие моменты в контрольных сечениях образцов, задана программой испытаний для соответствующего режима испытаний. Число ступеней равно 3. Запись напряжений на каждой ступени производилась по 3 раза. По среднеарифметическим значениям замеренных напряжений строились графики зависимости переменных напряжений в контрольных точках образцов от амплитуды колебаний, которая записывалась в течение всего периода испытаний. В напряженных сечениях образца возникают напряжения, изменяющиеся по симметричному циклу. Для обеспечения точности поддержания режима испытаний в пределах требований программы испытаний через каждые 15 мин производился контроль амплитуды по мерному клину с занесением результатов в журнал испытаний. Контроль статической подгрузки производился через каждые 10 млн. циклов. При измерениях переменных напряжений использовался комплекс тензометрической аппаратуры. Пределы выносливости были определены на базе $20 \cdot 10^7$ циклов по формулам

$$y_w = \sqrt[6]{\frac{\sum y_i^6 N_i}{20 \cdot 10^6}} \quad \text{или} \quad M_w = \sqrt[6]{\frac{\sum M_i^6 N_i}{20 \cdot 10^6}},$$

где y_i – напряжения на i -ном режиме испытаний; M_i – изгибающие моменты на i -ном режиме испытаний; N_i – наработка циклов на i -ном режиме испытаний.

Приведенная наработка циклов для образцов среднего участка

$$N_{np} = \sum N_{pi} \left(\frac{y_{pi}}{y_{\bar{ii}}} \right)^6,$$

где N_{pi} – наработка циклов в разрушившемся сечении на i -ном режиме испытаний; y_{pi} – напряжения в разрушившемся сечении на i -ном режиме испытаний; $y_{\bar{ii}}$ – заданное программой переменное напряжение в контрольном сечении.

Заданное программой напряжение равно $y_{\bar{ii}} = 5,5 \cdot \bar{\sigma}$,

где коэффициент $\bar{\sigma} = \frac{y_{5a} + y_5 + y_{6a} + y_6}{y_{3a} + y_3 + y_{4a} + y_4}$. Модуль упругости для образцов среднего участка

алюминиевого сплава равен $0,72 \cdot 10^5$ МПа.

Для построения кривой усталости по обычной методике проводили испытания 8 образцов. На рисунке 1 представлены результаты образцов среднего участка лопасти при растяжении-сжатии (симметричный цикл с коэффициентом $R = -1$) по оси абсцисс отложено число циклов $\lg(N)$, которые выдержали образцы до разрушения, по оси ординат – амплитуда пе-

ременных напряжений y_{σ} (МПа). Образец №1, испытанный при амплитуде $y_a = 104,9 \text{ МПа}$, проработал до разрушения $3,3 \cdot 10^6$ ($\lg(N) = 6,5$) циклов (что соответствует ординате и абсциссе точки 1). Образец №2, испытанный при амплитуде $y_a = 100,6 \text{ МПа}$, разрушился при числе циклов $N = 4,2 \cdot 10^6$ ($\lg(N) = 7,68$). Постепенное снижение амплитуды напряжений приводит к повышению долговечности образца, под которой понимается число циклов до разрушения образца (или до появления трещины заданных размеров). Так, образец №6 при амплитуде $y_a = 75,5 \text{ МПа}$ проработал до разрушения $N = 48 \cdot 10^6$ ($\lg(N) = 7,68$) циклов (точка 6). Образец №8 при амплитуде $\sigma_a = 56 \text{ МПа}$ проработал без разрушения $51 \cdot 10^6$ циклов ($\lg(N) = 7,7$). В процессе более длительных испытаний было установлено, что в условиях нормальных температур и отсутствии коррозии (при обычных атмосферных условиях) образцы, не разрушившиеся при $N = 51 \cdot 10^6$ циклов, не разрушаются и далее.

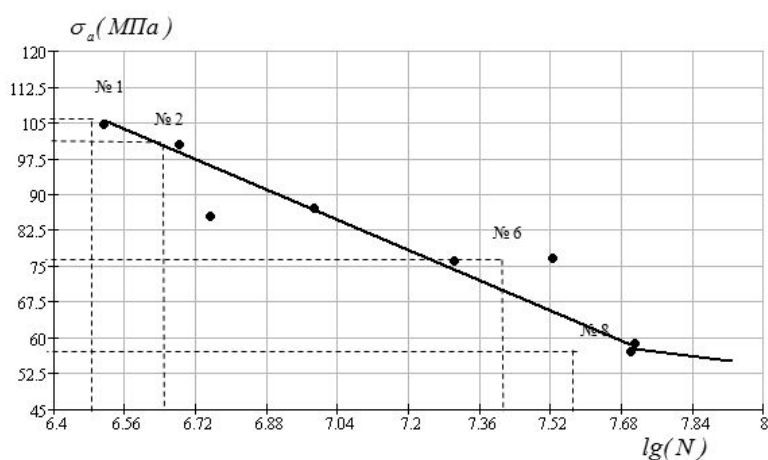


Рис. 1. Кривая усталости образцов среднего участка лопасти

Предварительно задаваемое число циклов напряжений, до которого образцы испытывают на усталость, называют базой испытания и обозначают N_{σ} . В данном случае это число равно $N_{\sigma} = 51 \cdot 10^6$ циклов. Амплитуда $\sigma_a = 56 \text{ МПа}$, соответствующая середине интервала, обладает тем свойством, что при $y_a < 56 \text{ МПа}$ образцы не разрушаются до базы испытания, а при $\sigma_a > 56 \text{ МПа}$ — разрушаются. Такое значение амплитуды напряжений при симметричном цикле называют пределом выносливости при симметричном цикле и обозначают σ_{-1} (индекс «-1» указывает на значение коэффициента асимметрии цикла). Таким образом, по результатам описанных испытаний найдено, что предел выносливости при симметричном цикле для образца составляет $\sigma_{-1} = 56 \text{ МПа}$.

При испытании ограниченного числа образцов предел выносливости определяется как наибольшее значение максимальных (по величине) напряжений цикла, при действии которого еще не происходит образование усталостных трещин заданной протяженности или полного усталостного разрушения образцов до заданного числа циклов. Через экспериментальные точки (рис. 1) проведены наклонные линии, которые в совокупности образуют кривую усталости, или кривую Веллера.

Уравнение левого наклонного участка кривой усталости, изображаемой в полулогарифмических координатах прямой линией, имеет вид

$$\sigma_a + K \lg N = \sigma_{-1} + K \lg N_0, \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости; N_0 – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости, а $N_0=51 \cdot 10^6$ ($\lg(N)=7,7$) циклов, $\sigma_{-1}=56$ МПа; K – коэффициент, характеризующий наклон левого участка кривой усталости.

Для определения коэффициента K необходимо, кроме σ_{-1} и N_0 , знать координаты одной точки наклонной линии. Например, на рисунке 1 в качестве таких координат могут быть взяты $\sigma_a=100,6$ МПа, $N=4,3 \cdot 10^6$ (точка 2). Тогда из уравнения (1)

$$K = \frac{y_a - y_{-1}}{\lg N_0 - \lg N} = \frac{100,6 - 56}{7,7 - 6,65} = 42,47.$$

Кривая усталости не имеет явно выраженного горизонтального участка и постепенно непрерывно снижается. При этом сопротивление усталости характеризуют пределом ограниченной выносливости σ_{-1N} , под которым понимают максимальное напряжение цикла, соответствующее по кривой усталости числу циклов N . В этом случае кривую усталости аппроксимируют тогда двумя прямыми линиями в двойных логарифмических координатах, описываемыми уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a^{m_1} N &= \sigma_{-1N_0}^{m_1} N_0 & \text{при } \sigma_a \geq \sigma_{-1N_0} \\ \sigma_a^{m_2} N &= \sigma_{-1N_0}^{m_2} N_0 & \text{при } \sigma_a < \sigma_{-1N_0} \end{aligned} \right\},$$

где σ_{-1N_0} – предел ограниченной выносливости, соответствующий числу циклов N_0 , причем $\lg \sigma_{-1N_0}$ и $\lg N_0$ являются координатами точки пересечения указанных прямых; m_1, m_2 – соответственно показатели углов наклона верхней и нижней частей кривых усталости.

Для описания указанных кривых усталости используют также уравнения Вейбулла:

$$(\sigma_a - \sigma_{-1\infty})(N = N_1)^\beta = B,$$

где N_1, β, B – параметры уравнения; $\sigma_{-1\infty}$ – предел выносливости, соответствующий неограниченной базе ($N=\infty$).

Для этой же цели предложено уравнение обобщенной кривой усталости, которая является общей для деформируемых алюминиевых сплавов при изгибе с вращением:

$$\bar{\sigma}_a = \bar{\sigma}_{-1} + A[\lg(N + N_1)]^{-\alpha},$$

где $\bar{\sigma}_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}$; $\bar{\sigma}_{-1} = \frac{\sigma_{-1\infty}}{\sigma'_{-1}}$; N_1, A, α – параметры уравнения; σ'_{-1} – предел выносливости, соответствующий базе $N_0 = 51 \cdot 10^6$ циклов.

Характеристики сопротивления усталости, такие как число циклов до разрушения N и предел выносливости при симметричном цикле, являются случайными величинами при ресурсных испытаниях среднего участка лопасти. Для изучения закономерностей рассеяния характеристик выносливости проводились испытания среднего участка лопасти по четырем режимам нагружения. Общее количество испытанных образцов $n=84$. По результатам усталостных испытаний большого числа идентичных образцов при одном уровне амплитуды напряжений получается большой разброс на долговечность. Такие характеристики сопротивления усталости, как число циклов разрушения N и предел выносливости σ_{-1} являются случайными величинами, поэтому можно говорить о статистической природе процесса усталостного разрушения.

Случайная величина X характеризуется функцией распределения $F(x)$, определяющей вероятность того, что X будет меньше, чем заданная величина x

$$F(x) = P(X < x),$$

где $P(X < x)$ – вероятность.

Вероятность событий P – постоянное число, которое определяется отношением числа благоприятствующих данному событию исходов испытаний n ко всему числу возможных исходов испытания n_{Σ} при $n_{\Sigma} \rightarrow \infty$

$$P = \lim_{n_{\Sigma} \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{n_{\Sigma}} \right).$$

Функция $F(x)$ возрастающая и стремится к единице с увеличением x до бесконечности. Если $F(x_1) = P(X < x_1)$ и $F(x_2) = P(X < x_2)$, то вероятность попадания случайной величины X в интервал $x_2 - x_1$ будет равна $P(x_1 < X < x_2) = F(x_2) - F(x_1)$. Так как первая производная от $F(x)$ по x является дифференциальной функцией распределения $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$, то можем записать следующее выражение:

$$P(x_1 < X < x_2) = \int_{-\infty}^{x_2} f(x) dx - \int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx.$$

Согласно вероятности P число попаданий случайной величины в заданном интервале будет

$$n(x_1 < X < x_2) = n_{\Sigma} P(x_1 < X < x_2) = n_{\Sigma} \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = n_{\Sigma} [F(x_2) - F(x_1)].$$

Построим эмпирическую функцию распределения случайной величины $X = \lg(N)$ и определим параметры этой функции методами математической статистики. Логарифмы полученных чисел циклов до разрушения располагают в возрастающем порядке, образуя, таким образом, вариационный ряд, служащий исходной информацией для статистической обработки и графического изображения функции распределения случайной величины. Для получения параметров функций распределения долговечности проводим статистическую обработку исходной информации по методам В.П. Когаева [3]. Введем функции распределения случайной величины $X = \lg(N)$ и расположим в возрастающем порядке, а именно в виде $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$. На рисунке 2 представлена функция распределения долговечности среднего участка лопасти. По оси абсцисс откладываются значения $X_i = \lg(N_i)$ в равномерном масштабе, по оси ординат – оценки вероятности разрушения, вычисленные по формуле $P = \frac{i - 0,5}{n} 100\%$, где n число образцов, испытанных при данном уровне нагружения. Такой график называется полной вероятностной диаграммой усталости.

При I режиме испытаний опытные данные аппроксимирует функция регрессии с использованием полинома второго порядка, которая в системе Mathcad реализует комбинацию встроенных функций регрессии (regress) и интерполяции (interp). При II режиме испытаний экспериментальные данные интерполирует сплайн-функция второго порядка (pspline). При III и IV режимах испытаний экспериментальные данные интерполирует линейная сплайн-функция (lspline). Общее количество испытаний равно $n=28$. Величины i являются порядковыми номерами соответствующих значений $\lg(N)$. Среднее значение $\overline{\lg(N)}$ и среднеквадратичное отклонение $S_{\lg(N)}$ случайной величины являются параметрами распределения.

Статистические оценки этих величин имеют значения

$$\overline{\lg(N)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(N_i) = 7,701;$$

$$S_{\lg(N)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg(N_i) - \overline{\lg(N)})^2} = 0,0032.$$

Коэффициент вариации $v_{\lg(N)}$ случайной величины $\lg(N)$ равен $v_{\lg(N)} = 0.00042$.

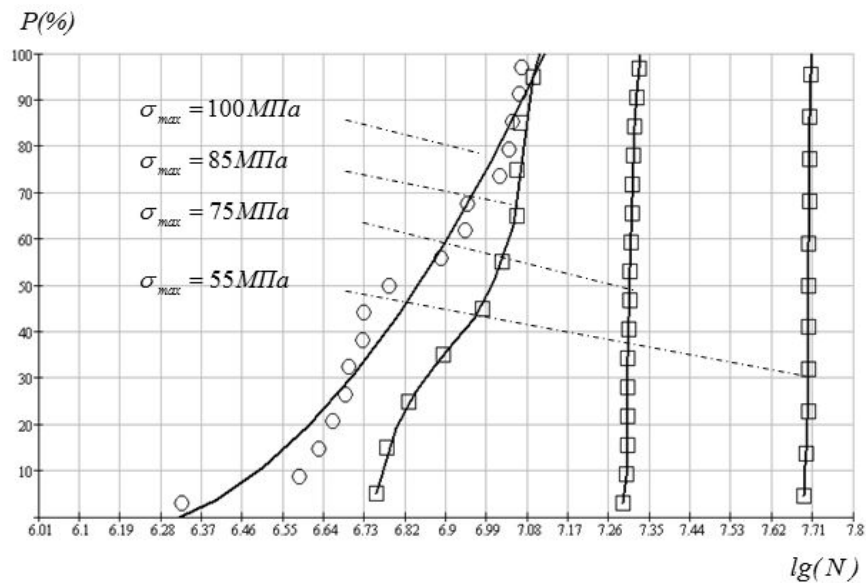


Рис. 2. Функции распределения долговечности образцов среднего участка лопасти из алюминиевого сплава при симметричном цикле

Полная вероятностная диаграмма усталости может быть представлена в виде семейства кривых усталости в координатах $\lg \sigma_{\max} - \lg N$ для различных вероятностей разрушения $P(\%)$. Графики строятся следующим образом: проводя горизонталь на рисунке 2, соответствующую $P(\%)$, получаем следующие значения σ_{\max} и $\lg(N)$ для точек пересечения с линиями распределения. По полученным данным получаем кривые усталости образцов средней части лопасти из алюминиевого сплава, соответствующие различным вероятностям разрушения (рис. 2). Полная вероятностная диаграмма усталости может быть также представлена в виде функции распределения пределов выносливости в координатах $P - \sigma_{\max}$ по параметру числа циклов (рис. 3). Графики строятся следующим образом: проводя вертикаль на рисунке 2, соответствующую N , получаем следующие значения σ_{\max} и $P(\%)$ для точек пересечения с линиями распределения.

На рисунке 3 представлены зависимости параметров функций распределения пределов выносливости при различных числах циклов по нормальному закону распределения, а на рисунке 4 представлены параметры этих функций распределения пределов выносливости при различных циклах. Так, например, при $N=5,2 \cdot 10^6$ среднее значение выносливости $\bar{\sigma}_{-1}=85\text{МПа}$ получается по линии при $u_p = 0$ ($P=50\%$). Квантили $u_p = 1$ ($P=84\%$) соответствует значение $(\bar{\sigma}_{-1})_{u_p=1} = 109\text{МПа}$. Отсюда следует среднеквадратичное отклонение $S_{\sigma_{-1}} = 24\text{МПа}$. Предельное напряжение $\sigma_{\lim} = 93,6\text{МПа}$ – среднеквадратичное отклонение

$S_{\lim} = 18,4\text{МПа}$. При значениях $n = \frac{\bar{\sigma}_{\lim}}{\bar{\sigma}} = 1,1$; $v_{\sigma \lim} = \frac{S_{\sigma \lim}}{\bar{\sigma}_{\lim}} = 0,196$; $v_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\bar{\sigma}}$;

$u_p = -\frac{n-1}{\sqrt{v_{\sigma \lim}^2 n^2 + v_{\sigma}^2}} = 0,29$ получаем вероятность разрушения $P=61\%$ [4].

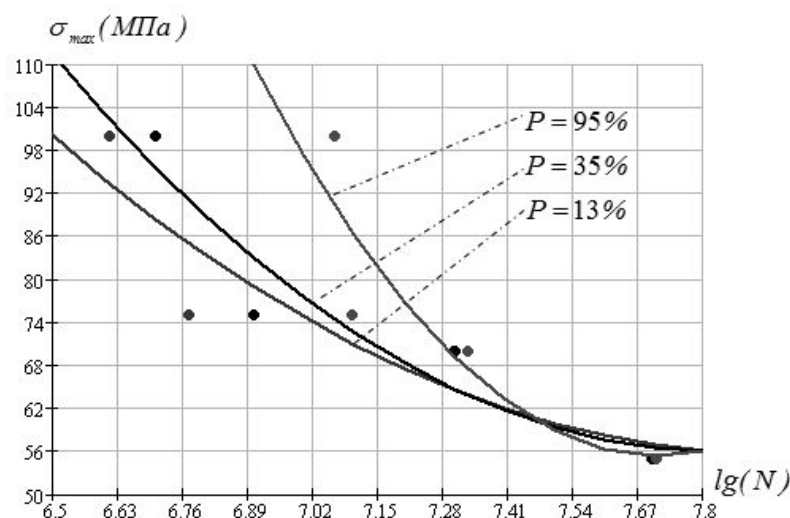


Рис. 3. Кривые усталости образцов среднего участка лопасти из алюминиевого сплава, соответствующие различным вероятностям разрушения

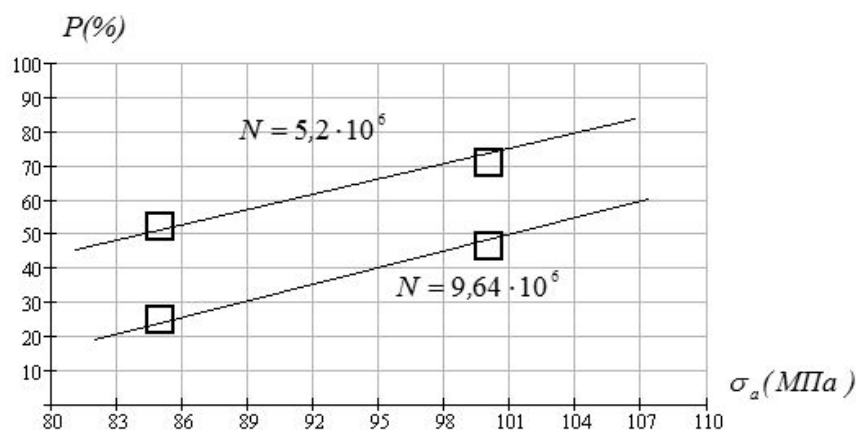


Рис. 4. Функции распределения пределов выносливости образцов среднего участка лопасти из алюминиевого сплава, соответствующие различным числам циклов

В данной работе определены характеристики сопротивления усталости конструкции лопасти несущего винта вертолета и приведены результаты контрольных испытаний образцов среднего участка лопасти несущего винта.

Библиография

1. Бохоева Л.А., Филиппова К.А., Rogov В.Е. Экспериментальное исследование, численное моделирование элементов каркаса остекления фонаря кабины вертолета из композиционного материала // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – Барнаул, 2012. – Т. 9, № 4/2. – С. 669–674.
2. Бохоева Л.А., Пнёв А.Г. Выбор и обоснование оптимальной технологии изготовления лопасти вертолета из композиционных материалов // *Известия вузов: Машиностроение*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – №5. – С. 37–42.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
4. Бохоева Л.А., Пнёв А.Г., Филиппова К.А. Разработка алгоритма автоматической обработки результатов эксперимента образцов из композиционных материалов с дефектами // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. – Казань, 2010. – № 4. – С. 10–17.

5. Буряев М.К., Лыгденов Б.Д., Rogov В.Е. и др. Проблемы регионального агротехнического сервиса // Вестник ВСГТУ. – 2012. – № 4. – С. 34–37.

Bibliography

1. Bokhoeva L.A., Filippova K.A., Rogov V.E. Experimental research, numerical simulation of elements of helicopter cockpit canopy glazing frame made from composite material // The fundamental problems of modern materials science. – Barnaul, 2012. – Vol. 9, N 4/2. – P. 669–674.

2. Bokhoeva L.A., Pnyov A.G. Selection and justification of the optimal technology of production of helicopter blade from composite materials // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. – M.: Bauman state technical university of Moscow, 2011. – N 5. – P. 37–42.

3. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 223 p.

4. Bokhoeva L.A., Pnyov A.G., Filippova K.A. Developing an algorithm of automatic processing of results of the experiment of samples made from composite materials with defects // Tupolev state technical university of Kazan Press. – Kazan, 2010. – N 4. – P. 10–17.

5. Buraev M.K., Lygdenov B.D., Rogov V.E. et al. Problems of regional agrotechnical service // ESSUT Press. – Ulan-Ude, 2012. – N 4. – P. 34–37.